



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA RURAL
COORDENAÇÃO DE AGRONOMIA**

**DESEMPENHO DO SOLO-CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE
BENTONITA**

ALÍCIA NAYANA DOS SANTOS LIMA DE BRITO

AREIA - PB

2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA RURAL
COORDENAÇÃO DE AGRONOMIA

**DESEMPENHO DO SOLO-CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE
BENTONITA**

Autora: Alícia Nayana dos Santos Lima de Brito
Orientadora: Fernanda Fernandes de Melo

AREIA - PB
NOVEMBRO - 2018

ALÍCIA NAYANA DOS SANTOS LIMA DE BRITO

**DESEMPENHO DO SOLO-CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE
BENTONITA**

Trabalho de Conclusão de Curso em
Agronomia apresentado à Universidade
Federal da Paraíba em cumprimento às
exigências para a obtenção do título de
Engenheira Agrônoma.

ORIENTADORA: Fernanda Fernandes de Melo

AREIA – PB

2018

Catálogo na publicação
Seção de Catálogo e Classificação

B862d Brito, Alícia Nayana Dos Santos Lima de.
DESEMPENHO DO SOLO-CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE
BENTONITA / Alícia Nayana Dos Santos Lima de Brito. -
Areia, 2018.
43 f. : il.

Orientação: Fernanda Fernandes de Melo.
Monografia (Graduação) - UFPB/CCA.

1. Argamassa. 2. Resíduo mineral. 3. Plasticidade. 4.
Resistência. I. Melo, Fernanda Fernandes de. II. Título.

UFPB/CCA-AREIA

ALÍCIA NAYANA DOS SANTOS LIMA DE BRITO

**DESEMPENHO DO SOLO-CIMENTO COM INCORPORAÇÃO DE
BENTONITA**

APROVADA EM: ____ / ____ / 2018

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^ª. Fernanda Fernandes de Melo (Orientadora)
DSER/CCA/UFPB

Prof^ª. Dr^ª. Tássia dos Anjos Tenório de Melo
DSER/CCA/UFPB

Prof. Dr. Raphael Moreira Beirigo
DSER/CCA/UFPB

DEDICATÓRIA

Dedico a Deus, por mais essa benção proporcionada em minha vida. Aos meus pais, Antonio Lima de Brito e Rosinete dos Santos Lima de Brito, por todo apoio, amor e compreensão oferecido em todos os momentos de minha vida, em especial, o início dessa jornada até a concretização desse tão esperado momento.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente a Deus, por me iluminar e dar o discernimento necessário para seguir sempre pelo o caminho correto, tendo a certeza da proteção e benção de Nossa Senhora dada a mim.

Aos meus maiores presentes e exemplos de pessoas, meus pais, Antonio Lima de Brito e Rosinete dos Santos Lima de Brito, por estarem sempre ao meu lado, me ajudando e incentivando a ser uma pessoa íntegra, honesta e verdadeira.

À minha família, em especial, meu irmão Alison, minha tia Patrícia junto com seu marido Dinha, meus primos Thaís e Thales, minha avó Lindalva e a estrela que me acompanha lá do céu, meu avô Totô, que sempre se fizeram presentes em todos os momentos de minha vida.

A todos os professores que contribuíram com a minha formação, compartilhando seus conhecimentos e experiências, em especial, à minha orientadora, professora Fernanda Fernandes de Melo Lopes, que sempre foi atenciosa e paciente, onde tenho uma consideração enorme e que é a principal responsável pelo meu encantamento na área de Construções Rurais e Ambiente; à professora Valéria Peixoto Borges, no qual tive a satisfação em trabalhar no projeto de extensão nesse último ano de curso; aos professores componentes da banca, Tássia e Raphael pela aceitação em ser os avaliadores desse trabalho juntamente com a professora Fernanda.

Às minhas amigas que sempre levo no peito, Dinah Castro, Mayara Lopes, Julya Rachel e Thamyres Ribeiro, que por mais difícil que seja nossos encontros devido à correria diária, sempre estiveram me apoiando e me passando energias positivas.

Aos presentes que a Universidade me deu, no qual tive a satisfação em conhecer e que vou levar com todo carinho pelo restante de minha vida, em especial, Bruno Henrique (pelo amor, companhia, paciência e apoio durante toda nossa trajetória juntos na Universidade e com a benção de Deus, fora dela também, agradeço diariamente a Ele pela sua presença em minha vida), Laysa Gabryella (pela cumplicidade, amizade e carinho de sempre, pelas várias “resenhas” passadas juntas, agradeço a Deus por tê-la colocado em meu caminho e oro sempre a Ele pra que nossa amizade esteja sempre fortalecida), Francisca Hortência (pelo companheirismo e conselhos diários, por esse coração imenso e alma intensa, por tantos momentos vividos, peço a Deus que proteja nossa amizade), Ana Maria (por ser essa pessoa incrível e que mesmo longe, sempre se

fez presente com sua amizade), Raphael Jovino (por ser um dos maiores incentivadores para que eu enfrentasse meu medo e me inscrevesse na monitoria da disciplina de Construções Rurais), José Lourivaldo (por sua bondade em sempre querer ajudar e por sua amizade), Diogo Danilo (por sua gentileza e atenção em todos os momentos comigo) e aos demais amigos de turma que contribuíram de forma direta ou indireta, seja nos momentos de estudo ou em momentos festivos, sempre levarei na memória e no coração com todo amor.

BRITO, A.N.S.L. **Desempenho do Solo-cimento com incorporação de Bentonita.** Areia, PB, 2018. 43p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia).

RESUMO

Devido ao alto valor socioeconômico e ambiental das nascentes, mostra-se necessário a conservação das mesmas para garantir a qualidade da água. Considerando a localização de uma nascente em meio a uma pastagem, visando sua vulnerabilidade à diversos agentes externos, emprega-se a técnica de proteção com o solo-cimento. O cimento possui a capacidade de estabilidade e resistência, porém outras incorporações podem ser feitas melhorando as propriedades físicas. Nesse sentido, a incorporação de argilas como a bentonita podem trazer benefícios como a redução da porosidade e aumento da plasticidade da mistura. Diante do exposto, o objetivo foi determinar o percentual ideal de substituição de solo por resíduo de bentonita, proporcionando melhorias das propriedades físicas e de estabilidade nas misturas solo-cimento visando a aplicação em barreiras de proteção de nascentes. A mistura foi elaborada no traço de 1:3 utilizando cimento Portland e solo de textura média, sendo que o solo foi constituído de misturas com bentonita, em substituições percentuais de 0, 10, 30, 50 e 100% em peso de solo por resíduo. Foram testadas física e mecanicamente, em testes de resistência, absorção de água e estabilidade volumétrica. Observou-se que o percentual adequado de bentonita em substituição do solo que houve um melhor comportamento para esse caso foi o tratamento com 10%, proporcionando melhores plasticidade e trabalhabilidade na hora da preparação das misturas, apresentando viabilidade, porém a retração hidráulica e consequente formação de fissuras podem fragilizar a sua utilização na proteção das nascentes.

Palavras-chave: Argamassa, Resíduo mineral, Plasticidade, Resistência.

BRITO, A.N.S.L. **Soil-cement performance with Bentonite incorporation.**Areia, PB, 2018. 43p. Course conclusion paper (Agronomy Graduation).

ABSTRACT

Due to the high socioeconomic and environmental value of the springs, it is necessary to conserve them to guarantee the quality of the water. Considering the location of a spring in the middle of a pasture, aiming at its vulnerability to various external agents, the soil-cement protection technique is used. The cement has the capacity of stability and resistance, but other incorporations can improve the physical properties. In this sense, the incorporation of clays such as bentonite can bring benefits such as reduction of porosity and increase of plasticity of the mixture. Considering the above, the objective was to determine the ideal percentage of soil substitution by bentonite, providing improvements of the physical properties and stability in the soil-cement mixtures, aiming at the application in the protection barriers of springs. The mortars was formed in the 1:3 trace using Portland cement and medium textured soil; and the soil was composed of mixtures with bentonite, in percent substitutions of 0, 10, 30, 50 and 100% by weight of soil per residue. They were physically and mechanically tested in resistance tests, water absorption and volumetric stability. It was observed that the adequate percentage of bentonite in substitution of the soil that had a better behavior in this case was the treatment with 10%, providing better plasticity and workability at the time of preparation of the mixtures, presenting viability, however the hydraulic retraction and consequent formation may weaken its use in the protection of springs.

Keywords: Mortars, Mineral residue, Plasticity, Resistance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Representação gráfica das quantidades granulométricas ideais para uma mistura solo-cimento	12
Figura 2.	Pesagem dos componentes da mistura.....	22
Figura 3.	Aspecto da mistura solo-cimento.....	22
Figura 4.	Ensaio de Abatimento.....	23
Figura 5.	Moldagem dos corpos de prova das misturas solo-cimento e solo-cimento-bentonita.....	24
Figura 6.	Corpos para teste de absorção por imersão	24
Figura 7.	Corpos-de-prova submetidos à secagem em estufa com temperatura de 60°.....	25
Figura 8.	Leitura das dimensões do corpo-de-prova com auxílio do paquímetro.....	26
Figura 9.	Corpos-de-prova submetidos ao teste de capilaridade	26
Figura 10.	Corpos-de-prova em ensaio de resistência à compressão.....	27
Figura 11.	Esquema gráfico (A) e elaboração de proteção de nascentes (B)	28
Figura 12.	Protótipos recobertos com as mistura solo-cimento finalizados.....	29
Figura 13.	Protótipos expostos ao sol	29
Figura 14.	Disposição dos protótipos para a coleta dos dados de temperatura superficial dos revestimentos estudados.....	30
Figura 15.	Formação de fissuras no tratamento com 100% Bentonita.....	32
Figura 16.	Desfragmentação dos corpos-de-prova com 100% de bentonita após secagem em estufa	33
Figura 17.	Presença de bolhas de ar no interior do corpo-de-prova	36
Figura 18.	Tensões suportadas pelas misturas dos tratamentos em estudo	37
Figura 19.	Formação e propagação de fissuras nos protótipos após a hidratação	38
Figura 20.	Temperaturas médias dos revestimentos estudados	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Caracterização química do cimento CP II-Z.....	20
Tabela 2.	Caracterização física do cimento CP II-Z.....	20
Tabela 3.	Quantidades de materiais para a formação do traço adotado nos tratamentos.....	23
Tabela 4.	Granulometria do solo utilizado da composição da mistura.....	31
Tabela 5.	Frações constituintes do solo utilizado.....	31
Tabela 6.	Diferença média entre as pesagens úmida e seca dos corpos-de-prova quando submetidos à absorção por imersão.....	32
Tabela 7.	Diferença média entre diâmetro e altura dos corpos-de-prova úmidos e secos quando submetidos à absorção por imersão.....	33
Tabela 8.	Diferença média entre as pesagens úmida e seca dos corpos-de-prova quando submetidos à absorção por capilaridade.....	34
Tabela 9.	Diferença média entre diâmetro e altura dos corpos-de-prova úmidos e secos quando submetidos à absorção por capilaridade.....	35
Tabela 10.	Valores em kgf da resistência à compressão obtidos no momento do ensaio para os tratamentos estudados.....	35

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	13
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 Solo	15
2.2 Cimento Portland	16
2.3 Solo-cimento.....	17
2.4 Bentonita	18
3.OBJETIVO GERAL	19
3.1 Objetivos Específicos:	19
4.MATERIAL E MÉTODOS.....	20
4.1 Caracterização do material da mistura.....	21
4.2 Produção dos corpos-de-prova.....	21
4.3Consistência ideal das misturas	23
4.4 Absorção por imersão	24
4.5Absorção por capilaridade	26
4.6 Resistência à compressão axial.....	27
4.7Simulação da proteção da nascente	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1. Caracterização dos materiais	31
5.2. Produção dos corpos-de-prova.....	31
5.3Teste de absorção por imersão	32
5.4 Teste de absorção por capilaridade	33
5.5 Teste de resistência à compressão axial.....	35
5.6 Análise dos protótipos	38
6.CONCLUSÕES	40
7.REFERÊNCIAS	41

1. INTRODUÇÃO

Ações de preservação de nascentes têm se tornado indispensáveis, visto que, atualmente as mesmas são consideradas como um recurso natural de altíssimo valor econômico, estratégico e social, devido à sua indispensabilidade para o desempenho de atividades humanas de todos os setores (CASTRO et al., 2007; SANTIAGO & DIAS, 2012).

Quando um aquífero aflora na superfície do terreno, dando origem a uma fonte de água de acúmulo ou um curso d'água de pequeno a grande porte, denomina-se de nascente. Aquela nascente que fornece água em abundância, continuidade e boa qualidade, em cota topográfica elevada, possibilitando sua distribuição por gravidade sem gasto de energia, é considerada como uma nascente ideal (CALHEIROS et al., 2004; FERREIRA et al, 2007).

Quando o assunto é abastecimento humano, seja ele direcionado ao consumo ou empregado em atividades diversas, tende-se a certa preocupação. Segundo Jede (et al., 2011, p.8) “a água de rios, lagos e reservatórios, utilizada diretamente para esse abastecimento, corresponde a apenas 0,26% do total da água do planeta”, ainda assim, parte importante dessa água se encontra imprópria para uso.

Para Castro e Gomes (2001) é difícil estabelecer um único método para a conservação de nascentes entre tantos existentes, porém podem-se fazer algumas recomendações básicas, como protegê-las contra qualquer agente externo que venha a romper o equilíbrio, diminuindo a quantidade e a qualidade da água.

Na elaboração da proteção de nascentes é comum o emprego do material conhecido como solo-cimento, que se constitui numa argamassa de fácil obtenção e propriedades compatíveis à utilização, principalmente no aspecto ecológico em comparação às argamassas tradicionais de cimento e areia. Apesar da adição do cimento conferir ao solo-cimento maior estabilidade e resistência, reduzindo os problemas com a durabilidade, outras incorporações podem ser feitas melhorando as propriedades físicas e térmicas da mistura e reduzindo o impacto ambiental através da utilização de materiais residuais.

A bentonita é um material argiloso que possui como principal característica sua grande expansibilidade: quando esta entra em contato com fluidos, seu volume aumenta cerca de 20 vezes (SANTOS, 1989). Essa característica de expansibilidade é fundamental para a utilização da bentonita como camada selante (THOMÉ & ORSO, 2007). Ela é capaz de melhorar as propriedades físicas das misturas promovidas com a sua incorporação, principalmente no que tange a uma maior plasticidade e melhor trabalhabilidade das

argamassas solo-cimento quando no estado fresco; graças à sua capacidade aglutinante quando na presença de água.

As barreiras de solo-bentonita (SB) foram inicialmente desenvolvidas no início dos anos 40 nos Estados Unidos (KOCH, 2002). Com o passar do tempo, centenas de barreiras foram construídas para funcionamento temporário ou permanente para o controle das infiltrações nas escavações (fundações e aterros) e, principalmente, para evitar as infiltrações de poluentes carregados por lençóis freáticos contaminados (RYAN & DAY, 2002).

O maior incremento na estabilidade das argamassas também pode ser alcançado quando há a incorporação da bentonita, e esse efeito é bastante conhecido na perfuração de poços, onde a bentonita é aplicada nas paredes conferindo uma adesão que promove a estabilização e reduz a possibilidade de desmoronamento. A aplicação das argamassas solo-cimento na preservação das nascentes tem a finalidade de evitar a contaminação do lençol freático ou do próprio olho d'água, de forma que impeça o contato de contaminantes localizados no solo, evitando presença direta de animais ou outros agentes externos, além de apresentar baixo custo e fácil execução, apresentando eficiência e fácil manutenção.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Diversas são as causas de degradação da qualidade da água das nascentes, sejam elas decorrentes das atividades agropecuárias e manejo inadequado, por eliminação da vegetação nativa e substituição por culturas agrícolas, pastagens e compactação decorrente do pisoteio de animais, como também da deposição de efluente nos mesmos.

Considerando a localização de uma nascente em meio a um pasto totalmente favorável aos riscos citados acima, evidencia-se a necessidade de preservação para que se tenha água fresca, de boa qualidade e fluindo sempre para o uso adequado e racional do produtor rural para com suas necessidades pessoais e como também dos seus afazeres no campo.

Segundo Crispim (et. al, 2012, p. 786) “a recuperação e proteção de nascentes traz à tona um conceito antigo, mas pouco difundido que é a proteção das nascentes com solo-cimento e em virtude de seu valor inestimável dentro de uma propriedade agrícola, deve ser tratada com cuidado todo especial”. A técnica de proteção com solo-cimento além de ser de baixo custo e fácil montagem, tem a capacidade de vedação e isolamento eficiente fazendo com que haja o afastamento de possíveis contaminantes externos.

2.1 Solo

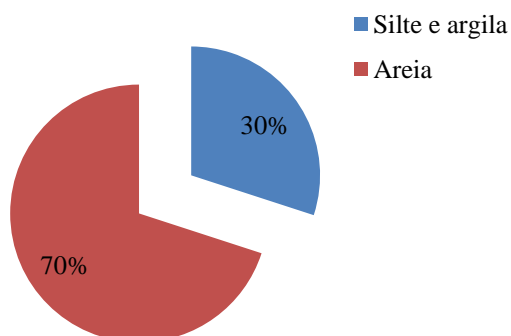
Segundo a EMBRAPA (1999), o solo consiste em “coleção de corpos naturais constituídos por parte sólida, líquida e gasosa, tridimensionais, dinâmicos, formados por materiais minerais e orgânicos, que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais. Contém matéria viva e podem ser vegetados”. Entre tantas definições que o solo possui, pode-se dizer ainda que o solo é a união de variados materiais, sejam eles orgânicos ou minerais, no qual passam por diversas mudanças ao decorrer do tempo por causa de agentes intempéricos que desintegram as rochas e fatores ambientais que provocam constantes transformações.

Solos orgânicos têm uma grande capacidade de trocas de cátions, o que influencia de forma negativa o processo de hidratação do cimento por causa da retenção de íons de cálcio libertados durante a hidratação do silicato cálcico e aluminato de cálcio no cimento (YU et al. 2014).

Os solos granulares (arenosos ou mais grosseiros) são mais adequados para este tratamento, devido à grande facilidade de mistura e elevada resistência obtidas (Minguela,

2007). Ainda segundo o autor, os solos mais indicados para este tipo de estabilização são as areias que contenham 30% de silte e argilas como representado na Figura 01.

Figura 1: Representação gráfica das quantidades granulométricas ideais para uma mistura solo-cimento.



Fonte: Minguela (2007).

O solo classificado como franco, tendo geralmente densidade intermediária, boa agregação, boa taxa de infiltração e nenhum impedimento à drenagem, representa um solo com ótimas condições físicas, podendo-se esperar boas produções, se outros fatores da produção não forem limitantes (LETEY, 1985). Solos com esse tipo de textura variam como franco arenosa em superfície, até franco argiloso dependendo da profundidade, possuindo definição entre seus horizontes.

Pacheco & Cantalice (2011) afirmam que solos que contenham ampla distribuição de tamanhos de partículas podem ter os espaços entre os poros maiores preenchidos por partículas menores, e, o espaço entre estas, preenchidos novamente por partículas muito finas, viabilizando a formação de camadas compactadas quando submetidos a pressões externas.

2.2 Cimento Portland

O cimento Portland é um pó fino que apresenta propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que com a ação da água, endurece e não mais volta ao estado de mistura quando exposto à água novamente. O nome desse material, criado por um construtor inglês chamado Joseph Aspdin, tem sua origem pela sua semelhança na cor e na dureza, com as pedras da Ilha de Portland (ABCP, 2002). A incorporação desse material ao solo proporciona entre outros aspectos, um aumento na resistência à compressão. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002) não é recomendado o uso do

cimento Portland de alta resistência inicial para solo-cimento em obras correntes, devido a este tipo de cimento apresentar menores resistências a agentes agressivos, como por exemplo, sulfatos presentes nos solos.

Minguela (2007) cita as qualidades desejáveis do cimento a ser empregado, sendo elas: longo tempo de início e fim de pega, para um maior prazo de trabalhabilidade; baixa liberação de calor de hidratação, a fim de minorar as retrações térmicas e limitar as fissuras por retração; desenvolvimento lento da resistência, procurando limitar o efeito da retração e os fenômenos iniciais de fadiga induzido pelas cargas do tráfego. Nesse sentido, cimentos com incorporações de materiais pozolânicos apresentam-se mais adequados às misturas produzidas para estabilização dos solos.

A ABCP (2002) recomenda que o cimento deve entrar na mistura solo-cimento em uma quantidade que varia de 5% a 10%, dependendo das características do solo, do peso do solo seco, o suficiente para estabilizá-lo e conferir as propriedades de resistência desejadas para o composto.

2.3 Solo-cimento

Para a construção com terra, é preciso conjugar duas condições básicas: a existência da matéria-prima em abundância e o conhecimento adequado das técnicas de construção. A terra crua e o solo-cimento utilizam como matéria-prima bruta a própria terra, necessitando apenas da energia mecânica humana para a sua fabricação, ou seja, moldagem. Além de poderem ser utilizadas com facilidade por indivíduos de menor poder econômico, é excelente agente de integração entre comunidades carentes, seja em nível de formação de mão-de-obra especializada, seja em nível de implementação de programas de moradias populares construídas pela comunidade, o que acarreta ganhos nos aspectos social, econômico e ambiental (XAXÁ, 2013). Trata-se de um sistema construtivo milenar, datado de cerca de 5.000 anos e que, ainda hoje é o método construtivo mais utilizado em todo o mundo, apesar da crescente industrialização e até informatização na área da construção civil (SILVA, 2000).

Segundo a NBR 12023 (ABNT, 1992), o solo-cimento é o produto endurecido, resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem. De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), o solo-cimento é o material resultante da mistura homogênea, compactada e curada de solo, cimento e água em proporções adequadas. O produto resultante

deste processo é um material com boa resistência à compressão, bom índice de impermeabilidade, baixo índice de retração volumétrica e boa durabilidade.

Não se tem ao certo critérios de dosagens bem estabelecidas para a formação do solo-cimento, quando comparada às argamassas e aos concretos. O que determina a resistência e consistência adequadas à mistura é o fator água/cimento, combinado à quantificação mínima e tipo de cimento utilizado, classificação e propriedades do solo, aliado a uma moldagem ideal, acompanhado de testes laboratoriais para aquisição da idealidade das propriedades mecânicas. O solo-cimento é de fácil elaboração e aplicação, além de apresentar-se como uma alternativa mais ecológica e menos impactante ao meio ambiente.

2.4 Bentonita

Os resíduos minerais podem ser aproveitados em diversos produtos da construção civil como na elaboração de argamassas e concretos. Seu aproveitamento depende especificamente de suas propriedades físicas e mineralógicas, que determinam as situações mais viáveis a aplicação.

As bentonitas são descritas na literatura como rochas derivadas de alterações de cinzas vulcânicas, essas cinzas são depósitos sedimentares que se acumulam em camadas durante as erupções vulcânicas, estas cinzas por sua vez encarregam-se de formar sólidos desordenados que contam ainda, em sua estrutura, com minerais acessórios (SOUZA, 1975). As argilas bentoníticas podem ser classificadas em dois grupos a partir de sua capacidade de inchamento, as que incham sensivelmente quando em presença de água e as que não incham, mas também podem receber classificação por cátions de compensação presente nestas argilas subdividindo-as em poli ou monocatiônica (LUZ & OLIVEIRA, 2005).

Como a bentonita é um material pulverulento, extremamente fino, ou seja, um material aglutinante, possui ação direta no estado fresco da argamassa em que possa ser incorporada, de forma que venha agir diretamente no aglomerante, dispersando-o parcialmente e proporcionando, teoricamente, uma maior resistência à compressão pela redução da porosidade, além de uma melhora considerável na trabalhabilidade e plasticidade da mistura.

3. OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência de uma argamassa de solo-cimento a partir da substituição de solo por bentonita.

3.1 Objetivos Específicos:

- Analisar diferentes proporções de bentonita, na mistura solo-cimento, quanto às propriedades físicas: absorção de água, plasticidade e retração.
- Avaliar a resistência mecânica à compressão axial das misturas solo-cimento, com diferentes proporções de bentonita.
- Analisar a viabilidade técnica da argamassa com incorporação de bentonita aplicada como barreira de proteção de nascente quanto a sua estabilidade.
- Comparar o comportamento das barreiras de proteção elaboradas com misturas solo-cimento e solo-bentonita-cimento.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Para a elaboração das misturas solo-cimento foram utilizado cimento Portland Elizabeth do tipo composto com pozolanas e classe de 32Mpa (CP II Z 32), fornecido pela empresa ELIZABETH CIMENTOS LTDA (ECL), localizada na cidade de Alhandra, PB, cuja composição concedida pelo fabricante é de 6 a 14% de pozolana, conferindo ao cimento uma maior impermeabilidade, melhor desempenho em ambientes agressivos, menor calor de hidratação (o que minimiza fissuras quando da secagem) e flexibilidade de aplicações; solo de textura média procedente do campus II da UFPB, CCA-Areia/PB, bentonita Fungel fornecida pela empresa EBM (EMPRESA BENEFICIADORA DE MINÉRIOS LTDA) e água da companhia de abastecimento de Areia.

Nas Tabelas 1 e 2 encontram-se as caracterizações do cimento fornecido pelo fabricante.

Tabela 1: Caracterização química do cimento CP II-Z 32.

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA				
Ensaio	NBR N°	Unidade	Resultado	Especificação da NBR
PF – Perda ao Fogo	NM 18/12	%	5,97	$\leq 6,50$
RI – Resíduo Insolúvel	NM 15/12	%	8,95	$\leq 16,0$
SO ₃ – Anidrido Sulfúrico	14656/01	%	3,02	Não aplicável
MgO – Óxido de Magnésio	14656/01	%	3,96	$\leq 6,50$

Fonte: Elizabeth Cimentos, 2015.

Tabela 2: Caracterização física do cimento CP II-Z 32.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA				
Ensaio	NBR n°	Unidade	Resultado	Especificação da NBR
Finura na peneira 0,075mm (#200)	12826/14	%	2,5	$\leq 12,0$
Finura na peneira 0,044mm (#325)	12826/14	%	8,8	Não aplicável
Área Específica (Blaine)	16372/15	cm ² /g	4240	≥ 2600
Massa Específica	NM 23/01	g/cm ³	3,06	Não aplicável
Água da Pasta Consistência Normal	NM 43/03	%	26,5	Não aplicável
Início de Pega	NM 65/03	h:min	02:25	≥ 1 h
Fim de Pega	NM 65/03	h:min	03:25	≤ 10 h
Expansibilidade a Quente	11582/12	Mm	0,1	≤ 5

Fonte: Elizabeth Cimentos, 2015

4.1 Caracterização do material da mistura

Como passo inicial para execução do projeto, fez-se necessário a caracterização física dos materiais supracitados para posterior composição das misturas. Para isso, foi realizada a análise granulométrica, da fração peneirada, mais interessante para a composição, no Laboratório de Construções Rurais e Ambientais (LACRA) pertencente ao curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), situado na cidade de Campina Grande.

A determinação dos constituintes do solo foi realizada no Laboratório de Física do Solo, pertencente ao Departamento de Solos e Engenharia Rural (DSER), Campus II da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), situada na cidade de Areia - PB.

A bentonita utilizada na produção das misturas foi fornecida pela empresa da EBM – EMPRESA BENEFICIADORA DE MINÉRIOS LTDA, a qual é nomeada de Bentonita Fungel, sendo comercializada em sacos de papel multifolhados de 25 kg cada, advinda da Fazenda Mumbuca, na Zona Rural da cidade de Pocinhos – PB. O tipo escolhido para a incorporação na argamassa foi a bentonita que tem a capacidade de inchar quando entra em contato com a água, a qual entra em suspensão formando rapidamente uma espécie de gel. Esse tipo de bentonita é formada não exclusivamente de sódio, mas sim de uma associação de minerais argilosos a qual é ativada pela indústria com a introdução do íon sódio. Testada devidamente de acordo com as normas do CONTEC (Comissão de Normas Técnicas), classificando-a como tipo I, de acordo com o “Ensaio de Argilas Ativadas para Água Doce”.

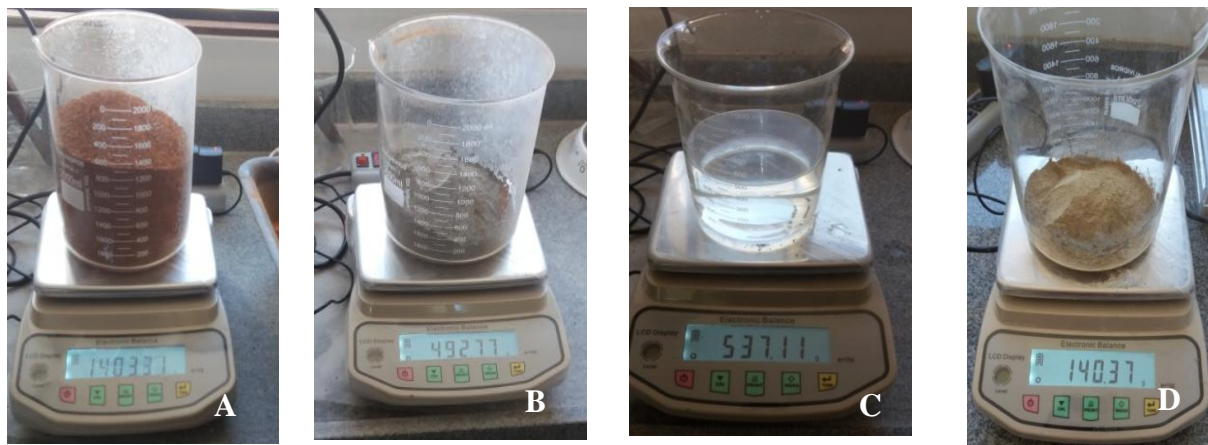
Segundo o fabricante sua viscosidade, nesse caso a viscosidade dinâmica, garante um bom desempenho em carregamento de sólidos perfurados, onde em concentrações baixas como 4.2 e 4.6 % em peso, permite obter uma capacidade viscosificante aparente de 15 cP (centipoise = 0.1g/cm.s), no qual a mesma está numa faixa de 4 a 5 cP para uma viscosidade considerada plástica.

4.2 Produção dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram confeccionados no Laboratório de Construções Rurais (LABCON) do Departamento de Solos e Engenharia Rural, CCA/UFPB. Cada componente das misturas no traço 1:3, de cimento Portland e agregado (solo e bentonita) com

substituições em peso de solo por bentonita nas concentrações de 0, 10, 30, 50 e 100% foram devidamente pesados, em balança semi-analítica, para a confecção da mistura (Figura 2).

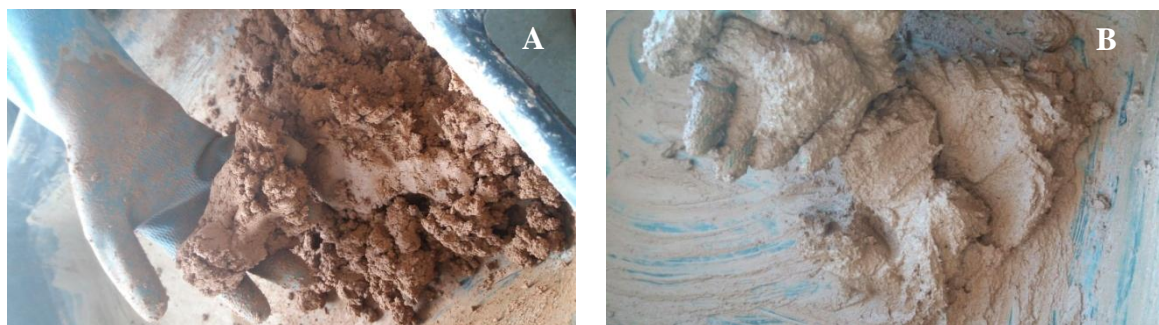
Figura 2: Pesagem dos componentes da mistura. A) Solo, B) cimento Portland, C) Água e D) Bentonita



Fonte: Autoria própria (2018)

A quantidade de água utilizada (fator água/cimento) foi definida pela consistência da mistura presente no momento da moldagem, observada através da adaptação do teste de abatimento. Visualmente, ao final do processo de amassamento, as misturas apresentaram-se plásticas e homogêneas (Figura 3).

Figura 3: Aspecto da mistura solo-cimento: A) início do amassamento; B) final do processo de amassamento.



Fonte: Autoria própria (2018)

Com relação aos tratamentos, inicialmente foram propostas as seguintes misturas: 100% solo (T); 10% bentonita + 90% solo (B10%); 30% bentonita + 70% solo (B30%); 50% bentonita + 50% solo (B50%); 100% bentonita (B100%). O ponto de consistência ideal desejada apresentou características como a facilidade na moldagem, sem a formação de bolhas de ar na massa quando no interior do molde e plasticidade sem haver o desprendimento

da água. A dosagem dos materiais para concepção das misturas pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3. Quantidades de materiais para a formação do traço adotado nos tratamentos.

MATERIAL	TRATAMENTO (g)				
	100% Solo	10% Bentonita	30% Bentonita	50% Bentonita	100% Bentonita
Solo	1403	1262,7	982	701,5	0
Bentonita	0	140,3	421	701,5	1403
Cimento	493	493	493	493	493
Água	493	739,5	986	1133,9	1873,4

Fonte: Autoria própria (2018)

4.3 Consistência ideal das misturas

Para alcançar o ponto visual e fisicamente ideal, sem prejuízo à moldagem, foi utilizada a metodologia de Abrams (Figura 4), adaptando-a à mistura, de acordo com o ensaio de abatimento NBR 67 (ABNT 1998). Para isso, foram colocadas no cone 3 camadas intercaladas da argamassa, em seguida aplicou-se 25 golpes/camada, posteriormente realizou-se a retirada do cone no espaço de tempo entre 5 a 10 segundos, para que fosse feita a medição do topo médio até a parte de baixo do cone com o auxílio de uma régua, alcançando assim a consistência plástica e valor uniforme para todos os tratamentos. Caso não houvesse a mesma altura e abatimento entre as misturas, imediatamente o fator água/cimento seria corrigido até alcançar as mesmas características das misturas anteriores.

Figura 4: Ensaio de abatimento. A) medição da altura do abatimento e B) forma da mistura na consistência ideal.



Fonte: Autoria própria (2018)

Para os ensaios de caracterização das misturas foram moldados 04 corpos-de-prova (Figura 5) para serem realizados 3 ensaios físicos e 1 mecânico para cada tratamento, sendo eles:

- Resistência à compressão axial aos 07 dias de moldagem, segundo a NBR 12025 (ABNT 2012);
- Absorção de água por imersão, segundo a NBR 9778 (ABNT 1987) (a mesma aplicada em argamassa tradicional);
- Absorção de água por capilaridade, segundo a NBR 9779 (ABNT 1995) (a mesma aplicada em argamassa tradicional);
- Retração após secagem.

Figura 5: Moldagem dos corpos-de-prova das misturas solo-cimento e solo-bentonita-cimento.



Fonte: Autoria própria (2018)

4.4 Absorção por imersão

Para o teste de absorção por imersão os corpos-de-prova foram colocados na água por 24h, retirados e submetidos à temperatura ambiente para que secassem naturalmente por 24h (Figura 6).

Figura 6: corpos para teste de absorção por imersão: A) corpos de prova imersos em água e B) submetidos a secagem natural.



Fonte: Autoria própria (2018)

Posteriormente, os corpos-de-prova foram levados à estufa com a temperatura de 60° por 24h (Figura 7). A secagem realizada em duas etapas, natural e forçada, foi necessária para evitar o aparecimento de fissuras nos corpos-de-prova pela saída prematura da água de hidratação. Após retirados da estufa, os corpos-de-prova passaram por medições e pesagens, onde em seguida foram submetidos a imersão, retirados da água e novamente pesados e medidos. As medidas foram tomadas para averiguar a retração ocorrida nos tratamentos, o que serve de referência para determinar a predisposição à formação de fissuras.

Figura 7: corpos-de-prova submetidos à secagem em estufa com temperatura de 60°



Fonte: Autoria própria (2018)

Utilizando-se um paquímetro foram realizadas as leituras das dimensões, de forma diametral e longitudinal das amostras úmidas e secas, sempre na mesma posição ao longo do corpo-de-prova (Figura 8). Para isso foram feitas marcações nessas posições, os quais foram analisados quanto ao encolhimento em termos percentuais posteriormente.

Figura 8: leitura das dimensões do corpo-de-prova com o paquímetro. A) medida longitudinal; B) medida diametral

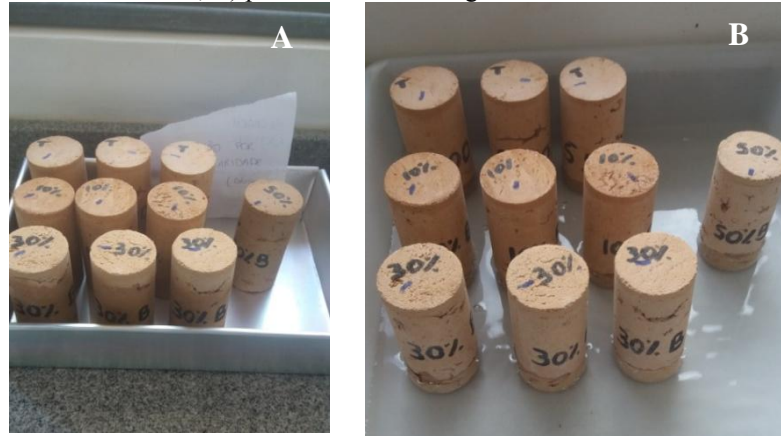


Fonte: Autoria própria (2018)

4.5 Absorção por capilaridade

Para o teste de absorção por capilaridade, foram utilizados os mesmos corpos-de-prova que resistiram ao teste anterior. Inicialmente sendo reservados até secarem totalmente de forma natural e sendo postos na estufa por 24h, repetindo o mesmo procedimento de pesagem e medição. Como etapa posterior, foram colocados em contato com uma lâmina d'água (Figura 9) com aproximadamente 2 cm, novamente pelo mesmo período de 24h, medidos e pesados.

Figura 9: corpos-de-prova submetidos ao teste de capilaridade: A) retirados da estufa; B) postos na lâmina d'água

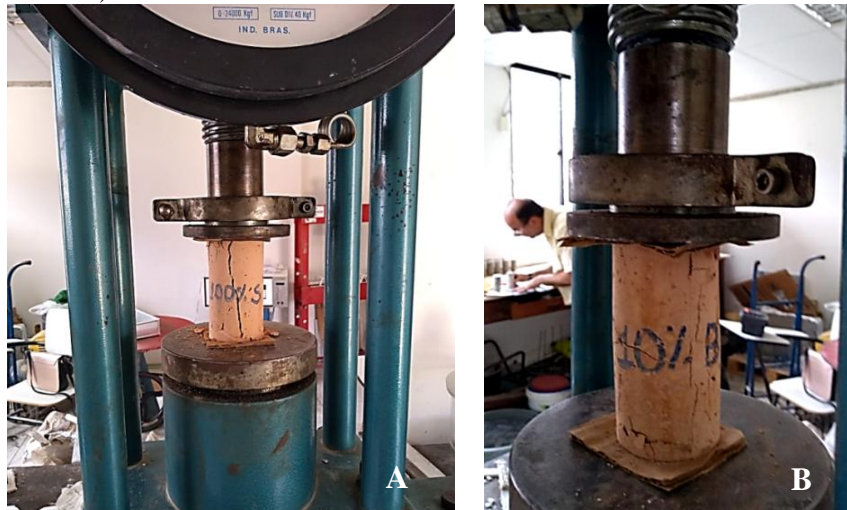


Fonte: Autoria própria (2018)

4.6 Resistência à compressão axial

Para o teste de resistência à compressão axial foram preparados novos corpos de prova, onde após desmoldagem foram postos à temperatura ambiente por 24h para serem medidos e pesados em seguida. Com todos os dados coletados, os corpos foram deixados submersos por 7 dias, até a retirada dos mesmos para serem levados até o Laboratório de Construções Rurais e Ambiente, localizado na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) – Campina Grande, PB, onde foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial (Figura 10).

Figura 10. Corpos-de-prova em ensaio de resistência à compressão. A) 100% Solo e B) 10% Bentonita



Fonte: Autoria própria (2018)

Após o período de cura, os corpos-de-prova foram rompidos em uma prensa hidráulica marca CONTENCO, modelo Pavitest, com capacidade de 0 a 24000kgf. Para a obtenção da tensão suportada (MPa – megapascal) utilizou-se a Equação 1, calculando a área da seção transversal dos corpos-de-prova cilíndricos a partir do diâmetro médio de 5cm.

$$T = (F/A) / 10,1972 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

T = Tensão de compressão suportada (MPa);

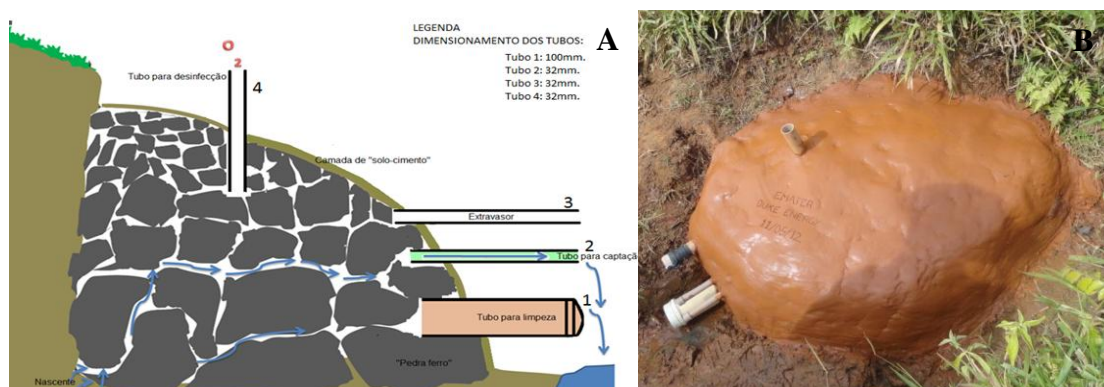
F = Força suportada, obtida no ensaio com a prensa (kgf);

A = área da seção transversal do corpo-de-prova (cm²).

4.7 Simulação da proteção da nascente

Ao final, para observar o comportamento das misturas produzidas sob a condição de trabalho, foram produzidas pequenas cúpulas que simulavam a situação do sistema de proteção de nascente, conforme exemplificado pelas imagens da Figura 11.

Figura 11. Esquema gráfico (A) e elaboração de sistema de proteção de nascentes (B).



Fontes: Souza (2014) e Alemão (2017).

Os protótipos desenvolvidos apresentavam formas semelhantes a cúpulas, e assim foram denominados, sendo a primeira (C1) composta por mistura apenas de solo-cimento, a segunda (C2) com o tratamento que apresentou melhor desempenho físico-mecânico observado e uma terceira (C3) utilizando o mesmo tratamento que compôs a segunda cúpula com a incorporação de 5% de PET (Politereftalato de etileno). A incorporação do PET foi utilizada no intuito de incrementar a estabilidade e diminuir a fissuração. Foram submetidos às condições de serviço em ambiente aberto e ensolarado para a avaliação da sua estabilidade quanto a variação volumétrica, através da formação de trincas e fissuras, quando alimentado com água e a possibilidade de desagregação. Além disso, foram tomadas as temperaturas superficiais em três pontos no intuito de averiguar a influência dos materiais constituintes da mistura na redução da carga térmica recebida.

Para a montagem das cúpulas foi necessária a utilização de bandejas como suporte (base). O interior do protótipo foi constituído de pedras em diferentes granulometrias, com intuito de formar um filtro para a passagem da água. A estabilização das pedras foi feita com o próprio solo adicionado de água, formando uma espécie de lama. Um tubo de PVC foi acoplado à cúpula, fazendo a ligação do meio externo para o interior da cúpula, para a alimentação do sistema com a água, possibilitando a sua umidificação. Depois de preparados,

os protótipos receberam as misturas solo-cimento como revestimento e foram submetidos à secagem natural por 24 horas antes dos testes descritos anteriormente (Figura 12).

Figura 12. Protótipos recobertos com as mistura solo-cimento finalizados: A) melhor mistura; B) melhor mistura+5%PET; C) 100% solo-cimento



Fonte: Autoria própria (2018)

Antes da exposição ao ambiente ensolarado, os protótipos receberam 100ml de água através da tubulação (Figura 13).

Figura 13. Protótipos expostos ao sol: A) melhor mistura; B) melhor mistura + 5% PET; C) 100% Solo-cimento



Fonte: Autoria própria (2018).

Após a avaliação da estabilidade, os protótipos foram analisados quanto a temperatura superficial utilizando-se um sistema automático para a coleta dos dados. O equipamento utilizado para tal teste foi a plataforma Arduino®, que consiste de um dispositivo micro controlador que pode ser usado de forma independente, pois possui sensores, nesse caso os termopares, e outros componentes auxiliares capazes de realizar tal feito. Os sensores de

temperatura foram distribuídos em cada cúpula, que em seguida foram colocadas ao sol durante 1 dia, em um local com solo coberto por vegetação que simulavam um pasto, no período entre 09h:35min até 12h:45min da manhã (Figura 14). Os dados foram coletados automaticamente a cada 05 minutos. Vale salientar que outros 3 sensores, localizados nas proximidades de cada cúpula, foram utilizados para coletar a temperatura do ar ambiente durante o ensaio.

Figura 14. Disposição dos protótipos para a coleta dos dados de temperatura superficial dos revestimentos estudados



Fonte: Autoria própria (2018)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização dos materiais

Foi analisada uma amostra de aproximadamente 500 g de solo para a granulometria (Tabela 4), no qual obteve-se a retenção média de aproximadamente 76,5 % nas 3 peneiras que apresentaram o valor do peso retido mais elevado. Enquadrando o material analisado numa classificação granulométrica de areia fina.

Tabela 4: Granulometria do solo utilizado na composição da mistura

ANÁLISE	PENEIRA N°/Malha (mm)			
	16/1,2 mm	30/0,6 mm	50/0,3 mm	100/0,15 mm
Peso Retido (g)	108,9	142,7	128,9	76,6
Retenção (%)	22	28,5	26	15,3

Fonte: Autoria própria (2018)

Para que obtivesse a classificação do solo, analisou-se uma amostra de 1000g, no qual quantificaram-se as frações dos constituintes do solo (Tabela 5), correspondendo a um solo de classe textural franca, onde caracteriza-se como um solo de boa porosidade, apresentando melhor infiltração e drenagem da água. A quantidade de areia foi considerada elevada quando comparada individualmente às outras frações que compõe o solo, no qual auxilia na hora da moldagem, visto que, deve-se ter, preferencialmente, um solo que contenha mais frações de areia para compor uma mistura de solo-cimento. Quando isso não é possível, pode-se fazer a correção com o acréscimo do teor de cimento para a formação da mistura ou uma correção no teor de areia na mistura.

Tabela 5: Frações constituintes do solo utilizado.

FRAÇÕES	QUANTIDADE (g)	CLASSIFICAÇÃO DO SOLO
Areia	484	Franco
Silte	312	
Argila	204	

Fonte: Autoria própria (2018)

5.2. Produção dos corpos-de-prova

No processo de produção dos corpos-de-prova, no qual foram elaborados 4 corpos-de-prova para cada tratamento, notou-se que após a secagem todo o tratamento com 50 e 100%

bentonita não apresentaram boa formação, com a presença de fissuras no momento da desmoldagem (Figura 15), o que causou a desfragmentação total posteriormente. Os demais tratamentos apresentaram algumas fissuras decorrentes das bolhas de ar formadas no momento da moldagem, comprometendo alguns dos corpos-de-prova.

Figura 15. Formação de fissuras no tratamento com 100% bentonita



Fonte: Autoria própria (2018)

5.3 Teste de absorção por imersão

Para o teste de imersão foram obtidos os dados no qual 3 corpos-de-prova foram submetidos à pesagem e medição antes e após a absorção, extraindo assim as médias e diferenças entre elas para a discussão.

Por apresentar apenas solo em sua composição (Tabela 6), o peso da testemunha foi elevado quando comparado aos demais tratamentos que possuem a bentonita em sua composição. Destacam-se os corpos-de-prova com o tratamento B10% devido a leveza e capacidade de fechamento entre poros que a bentonita proporciona à argamassa de solo-cimento, promovendo uma melhor ligação entre todas as partículas, conferindo impermeabilidade.

Tabela 6. Diferença média entre as pesagens úmida e seca dos corpos-de-prova quando submetidos a absorção por imersão.

Tratamento (mistura)	T	B10%	B30%
Peso (g)	68,56	61,45	67,67
Diferença (%) com relação a testemunha	-	10,4	1,3

T – Testemunha (100% solo), B10 (90% solo + 10% bentonita), B30 (70% solo + 30% bentonita).

Fonte: Autoria própria (2018)

A bentonita apresenta uma característica particular quando se uni à água, a mesma quando apresenta sódio ou íons de sódio em sua composição que faz com haja a formação de géis tixotrópicos, onde proporciona maior expansibilidade da argamassa a qual está constituída. O aumento torna-se esperado tanto no diâmetro como na altura dos corpos de prova em comparação ao solo-cimento (Tabela 7). A sua viscosidade proporciona à argamassa uma maior plasticidade, tornando-a mais maleável e com um rendimento maior. Apesar do poder expansivo que as bentonita possuem observou-se que a variação volumétrica no ensaio foi inexpressiva.

Tabela 7. Diferença média entre diâmetro e altura dos corpos-de-prova úmidos e secos quando submetidos à absorção por imersão.

Tratamento (mistura)	T	B10%	B30%
Diâmetro (cm)	0,03	0,07	0,00
Altura (cm)	0,03	0,07	0,10

T – Testemunha (100% solo), B10 (90% solo + 10% bentonita), B30 (70% solo + 30% bentonita). Fonte: Autoria própria (2018)

5.4 Teste de absorção por capilaridade

Com o aumento da porcentagem de bentonita nos tratamentos de 50% e 100%, obteve-se um resultado insatisfatório após as secagens em estufa, impossibilitando o uso dos mesmos, visto que, previamente já não apresentaram uniformidade na desmoldagem com a presença de fissuras por não terem se adequados ao molde, mesmo possuindo consistência similar as demais argamassas, comprometendo todo o corpo-de-prova na retirada da estufa e, por fim, desfragmentando-se (Figura 16).

Figura 16. Desfragmentação dos corpos-de-prova com 100% de bentonita após a secagem em estufa.



Fonte: Autoria própria (2018)

Após o descarte total das amostras com 50 e 100% de bentonita, foi realizado o teste de absorção por capilaridade com os mesmos corpos-de-prova de constituíram o teste anterior, a fim de avaliar a capacidade que o corpo-de-prova possui em absorver a água, de forma vertical, assim quando entra em contato com a mesma, observando a tensão superficial de ambos e adesão das moléculas da água no interior do sólido.

Esse tipo de transporte da água em meio a estrutura provém de raios capilares e é consequência direta do contato da água com o corpo-de-prova. Essa passagem de umidade está condicionada tanto as características do material bem como fatores externos como condição de temperatura, umidade relativa, chuvas, incidência de radiação solar e pressão do vento (PEIXOTO, et al., 2008).

Na Tabela 8, nota-se uma alta variação na diferença de pesagens, onde a testemunha apresenta o valor alto em relação à pesagem do tratamento de 10% bentonita, o que já estava sendo esperado, visto que, os corpos-de-prova apresentaram boa resistência mesmo passando pelo teste anterior, absorvendo a água de forma correta e verificando mais uma vez à leveza proporcionada à argamassa pela presença da bentonita. O mesmo não aconteceu com o tratamento de 30%, onde os corpos-de-prova apresentaram inúmeras fissuras decorrentes aos processos de desmoldagem (compactação defeituosa dentro do molde) e do teste passado, fazendo com que a absorção da água fosse feita de forma desordenada, alterando os valores de forma incoerente.

Tabela 8. Diferença média entre as pesagem úmida e seca dos corpo-de-prova quando submetidos a absorção por capilaridade

Tratamento (mistura)	T	B10%	B30%
Peso (g)	35,93	31,27	52,85
Diferença (%) com relação a testemunha	-	13,0	32,0

T – Testemunha (100% solo), B10 (90% solo + 10% bentonita), B30 (70% solo + 30% bentonita).

Fonte: Autoria própria (2018)

Os valores resultantes ao que se diz respeito às diferenças entre médias do diâmetro e altura (Tabela 9), não apresentaram alterações significativas quando comparados ao teste por imersão, visto que, ambos os testes tiverem o mesmo tempo estimado, ou seja, 24h, porém o processo de absorção por capilaridade é mais lento que o esperado para imersão, assim como a quantidade de água para o mesmo é superior à lâmina d'água posta para a execução do teste de capilaridade. Diante disso apresenta-se os mesmos valores em diâmetro e altura dos corpos de prova.

Tabela 9. Diferença média entre diâmetro e altura dos corpos-de-prova úmidos e secos quando submetidos a absorção por capilaridade.

Tratamento (mistura)	T	B10%	B30%
Diâmetro (cm)	0,00	0,00	0,00
Altura (cm)	0,00	0,00	0,00

T – Testemunha (100% solo), B10 (90% solo + 10% bentonita), B30 (70% solo + 30% bentonita).

Fonte: Autoria própria (2018)

5.5 Teste de resistência à compressão axial

Novos corpos-de-prova foram elaborados na quantidade de 4 corpos-de-prova para cada tratamento. Devido as propriedades ligantes da bentonita, notou-se que a resistência dos corpos de prova com o tratamento 100% solo foi menor que os corpos que continham 10% de bentonita em sua composição. O nível de resistência mais elevado foi comprovado com os dados obtido do ensaio (em kgf), como pode ser visto na Tabela 10.

Tabela 10. Valores em kgf da resistência à compressão obtidos no ensaio para os tratamentos estudados.

Corpo de Prova (Nº)	Carga suportada sob compressão axial (kgf)			
	T	B 10	B 30	B 50
1	1050	1200	600	287,85
2	1000	1160	580	292,62
3	900	960	640	I
4	1000	960	540	I
Média	987,5	1070	590	

T – Testemunha (100% solo), B10 (90% solo + 10% bentonita), B30 (70% solo + 30% bentonita) e B50 (50% solo + 50% bentonita). I – Indeterminado.

Fonte: Autoria própria (2018)

Quando comparados os resultados, observa-se que o valor médio do tratamento com 30% bentonita foi 44,8% menos resistente que o tratamento com 10% de bentonita e 40% menor que o tratamento com 100% solo. O tratamento com 10% bentonita apresentou uma elevação de 8,6% na resistência quando comparado ao tratamento da testemunha com 100% solo. Esse resultado está diretamente relacionado à menor porosidade conferida pela bentonita, devido a sua granulometria mais fina que as partículas do solo. Porém é importante salientar que o aumento na concentração de bentonita, acima dos 10%, foi prejudicial por reduzir a resistência evidenciando uma instabilidade da aglutinação dos agregados na mistura (Figura 17). Em termos de tensão resistida (MPa), após o cálculo foi possível organizar os dados como mostrado na Figura 18.

Figura 17. Presença de bolhas de ar no interior do corpo-de-prova.



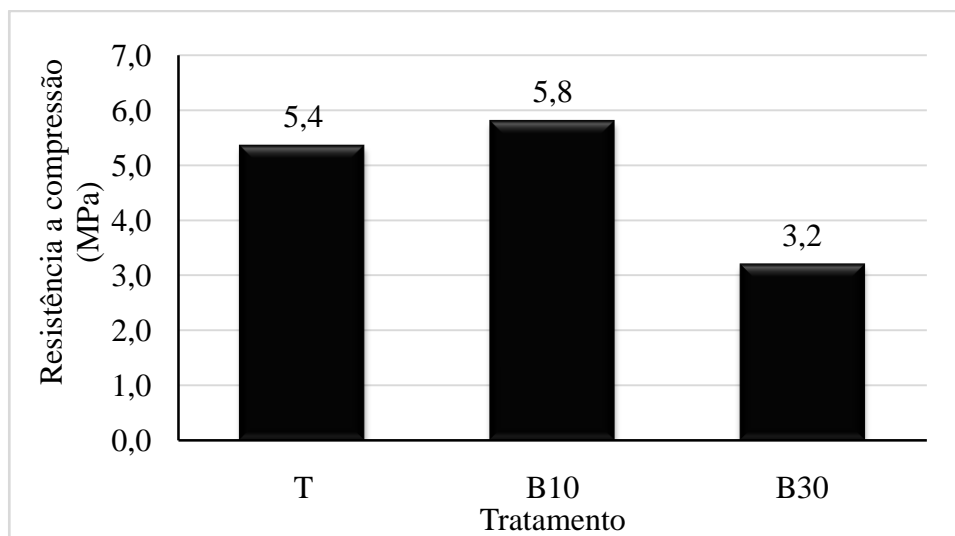
Fonte: Autoria própria (2018)

De acordo com NEVES (1988), a resistência mínima de 2 MPa é suficiente para garantir a qualidade de blocos de solo-cimento. Segundo a NBR 12253 (ABNT 1992), o cimento representa uma quantidade que varia entre 5% e 10% da massa do solo, sendo suficiente para promover a estabilidade e conferir as propriedades de resistência necessárias, considerando que as variações no teor de cimento ocorrem pela grande diversidade de solos existentes.

De acordo com a NBR 10834 (ABNT, 1994), blocos elaborados com solo-cimento devem apresentar valores médios de resistência à compressão $\geq 2,0$ MPa e valores individuais $\geq 1,7$ MPa, aos 28 dias. Com média de absorção de água $\leq 20\%$ e de valores individuais $\leq 22\%$, aos 28 dias.

Considerando que a idade mínima recomendada é de sete dias dos corpos de prova e que o traço utilizado para a montagem dos mesmos foi superior que à estabelecida na norma, requerendo assim uma maior quantidade de água e de materiais para conferir uma melhor consistência plástica na hora da moldagem, a resistência consequentemente também se mostrará elevada (Figura 18).

Figura 18. Tensões suportadas pelas misturas dos tratamentos em estudo.



T – Testemunha (100% solo), B10 (90% solo + 10% bentonita), B30 (70% solo + 30% bentonita). Fonte: Autoria própria (2018)

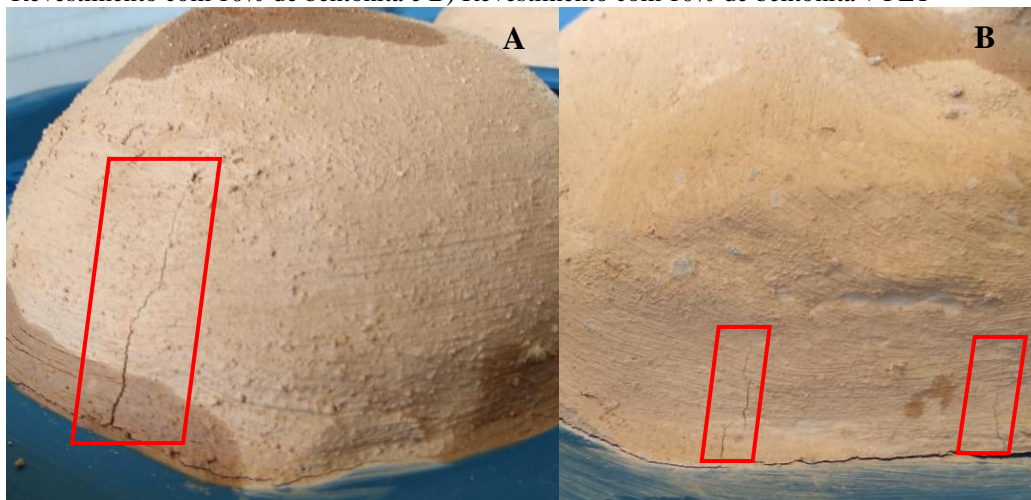
Uma maior resistência da argamassa de revestimento apresenta grande relevância na proteção da nascente, visto que, considerando a localização em pastagens o material está bastante vulnerável ao pisoteio animal. Além disso, pode proporcionar todos os outros benefícios que a manutenção da retenção de umidade no seu interior pode gerar.

Dessa forma, com base nos resultados físicos e mecânicos observou-se que a incorporação da bentonita na mistura solo-cimento, devido suas características como a capacidade absorvente e a baixa granulometria, resultaram na redução da porosidade, favorecendo a manutenção da temperatura adequada, através da retenção da umidade e consequentemente melhor conservação, quando adicionada a níveis abaixo de 30%, sem o comprometimento da integridade após o endurecimento. Essas características também ajudaram na impermeabilidade, o que favorece no decréscimo da perda da água por evaporação, além da promoção de certo aumento na resistência mecânica, podendo vir a impedir danos por meio de pisoteio quando localizadas em áreas de pastagem. Outra característica observada foi a melhoria da plasticidade em todas as misturas, por promover maior facilidade na moldagem quando no estado fresco da massa.

5.6 Análise dos protótipos

Para as misturas solo-cimento aplicadas como revestimento, T – Testemunha (100% solo), B10 (90% solo + 10% bentonita) e B10 P (90% solo + 10% bentonita e PET), evidencia-se as seguintes observações, após a obtenção dos dados: no processo de secagem, logo após a moldagem, houve a formação de algumas fissuras, devido à alta capacidade de expansão da bentonita, tanto para o tratamento B10 quanto para o B10 P, mesmo com a incorporação do PET; após a secagem natural e alimentação da água no interior do protótipo o processo de formação de pequenas fissuras assemelhou-se ao do momento anterior (após a moldagem) devido às propriedades expansivas da bentonita em contato com a água, porém em quantidade bem menor. Em se tratando do tratamento B10 P, a incorporação do PET triturado conferiu resistência à formação das fissuras no processo de secagem da mistura, provocadas pela retração hidráulica nas argilas (Figura 19).

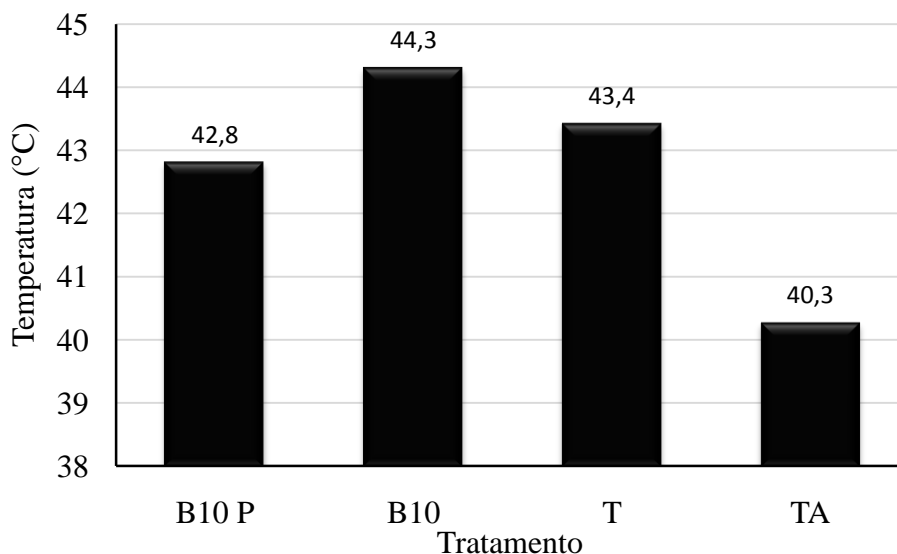
Figura 19: Formação e propagação de fissuras nos protótipos após a hidratação. A) Revestimento com 10% de bentonita e B) Revestimento com 10% de bentonita + PET



Fonte: Autoria própria (2018)

Com relação às temperaturas observadas nos protótipos pode-se constatar que todos os revestimentos apresentaram temperaturas maiores que a temperatura ambiente (Figura 20), com a menor diferença para o tratamento B10 P (2,5°C), enquanto que os tratamentos T e B10 obtiveram valores de 3 e 4°C, respectivamente. O melhor comportamento do tratamento B10 P pode estar associado à maior porosidade conferida pela incorporação do PET, o que favorece ao isolamento através do ar presente na mistura.

Figura 20. Temperaturas médias dos revestimentos estudados.



T – Testemunha (100% solo), B10 (90% solo + 10% bentonita), B10 P (90% solo + 10% bentonita e PET) e TA – Temperatura ambiente. Fonte: Autoria própria (2018)

Quando comparados os resultados entre testemunha e misturas com incorporação de bentonita, não se observa grandes diferenças com valores de 0,6 a 0,9°C para B10 P e B10, respectivamente. Entre os tratamentos com a incorporação da bentonita a diferença é mais significativa, com média de 1,5°C de superioridade no revestimento composto pela mistura B10. Novamente, o comportamento pode ser relacionado ao aumento da porosidade, pois ambos apresentavam os mesmos componentes minerais, ou seja, características térmicas semelhantes.

6. CONCLUSÕES

Diante do estudo, observou-se que o percentual adequado de bentonita em substituição ao solo que apresentou melhor comportamento neste caso foi o tratamento com 10% (B10%).

A incorporação de bentonita proporcionou melhores plasticidade e trabalhabilidade na hora da preparação das misturas, porém, cuidados em relação ao fator água/cimento devem ser intensificados, devido à necessidade de correção para uma consistência adequada que favoreça a moldagem e garanta a integridade da massa quando endurecida.

A incorporação de bentonita em baixas proporções na mistura solo-cimento apresenta viabilidade, porém, a retração hidráulica e consequente formação de fissuras podem fragilizar a sua utilização na proteção das nascentes, principalmente em áreas sujeitas a intensa insolação e pisoteio.

A utilização de materiais que promovam o aumento da porosidade da mistura pode melhorar significativamente a temperatura da superfície do revestimento da nascente, reduzindo a absorção do calor e a evaporação da água armazenada.

Vale salientar que a técnica de proteção de nascentes com solo-cimento-bentonita para uma maior durabilidade deve ser acompanhada com um isolamento da área, garantindo assim a preservação e melhoria na qualidade da água, proporcionando água fresca e livre de impurezas.

7. REFERÊNCIAS

- ALEMÃO, Alfredo Braz da Costa. **Proteção de Nascentes com a utilização desolo-cimento**. 2017. Disponível em: <<http://www.saude.pr.gov.br/arquivos/File/PROTCAODENASCENTES.pdf>>. Acesso em 18 de novembro de 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Guia básico de utilização de cimento Portland**. 7. ed. São Paulo, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 67 – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.
- _____. **NBR 10834 – Solo cimento - Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural - Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- _____. **NBR 12023 - Solo-cimento: Ensaio de compactação – método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1992.
- _____. **NBR 12025 - Solo-cimento: ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos: método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012.
- _____. **NBR 12253 – Solo cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- _____. **NBR 9778–Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. **NBR 9779 – Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 1995.
- CALHEIROS, R. O.; TABAI, F. C. V.; BOSQUILIA, S. V.; CALAMARI, M. **Preservação e recuperação de nascentes**. Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios PCJ- CTRN, XII, p.37. Piracicaba, 2004.
- CASTRO, P. S.; GOMES, M. A. Técnicas de conservação de nascentes. **Revista Ação Ambiental**, Viçosa: v.4, nº20, 2001.
- CASTRO, P.S; LIMA, F. Z.; LOPES, J.D.S. **Recuperação e conservação de nascentes**. Viçosa, MG, 2007.272p.
- CRISPIM, J. Q.; MALYSZ, S. T.; CARDOSO, O; JUNIOR, S. N. P. Conservação e Proteção de Nascentes por Meio do Solo-Cimento em Pequenas Propriedades Agrícolas na Bacia Hidrográfica Rio do Campo no Município de Campo Mourão - Pr. **Revista Geonorte, Amazonas**, v.3, n.4, p. 781-790, jun. 2012.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro declassificação de solos**.- Brasília: Embrapa Produção de informação; Rio de Janeiro: Embrapa solos, 1999. 412p.

FERREIRA, J. M; FERREIRA, C. W; BOTLHO A. S. Avaliação da Regeneração Natural do Entorno de uma Nascente como Estratégia para sua Recuperação. **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre. 2007.

JEDE, Altair Luiz et alli. **Saneamento básico rural**: qualidade da água no meio rural. Curitiba: Instituto Emater, 2011.

KOCH, D. Bentonites as a basic material for technical base liners and site encapsulation cut-off walls. **Applied Clay Science** v.21, Issues 1-2, p.1-11, 2002.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, p. 277-294, 1985.

LUZ, A. B.; OLIVEIRA, C.H.; **Bentonitas. Rochas e Minerais Industriais** – CETEM, 2005.

MINGUELA, J. D. “Ejecución de los Suelos Estabilizados In Situ”. **Jornada Explanadas Estabilizadas Y Capas de Firmes Tratadas com Cemento. Aspectos Prácticos**, Barcelona, Espanha, 2007.

_____. **Suelocemento. Jornada Explanadas Estabilizadas Y Capas de Firmes Tratadas com Cemento. Aspectos Prácticos**, Barcelona, Espanha, 2007.

NEVES, C. M. M. Desempenho de paredes – procedimento adotado para paredes monolíticas de solocimento. In: **Simpósio de desempenho de materiais e componentes de construção civil**, 1. Anais. Florianópolis, 1988, p. 58-64.

ORSO, J. M; THOMÉ, A. Execução de contenção de barreiras com solobentonita. In: **IV Seminário de Engenharia geotécnica do Rio Grande do Sul**, 2007

Pacheco EP & Cantalice JRB. Compressibilidade, resistência a penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Alagoas: 2011, 35:403-415.

PEIXOTO, V. F., TORRES, M. I., & GUIMARÃES, A. S. **Humidade Ascensional**. Porto: FEUP, 2008.

RYAN, C.R.; DAY, S.R. Soil-Cement-Bentonite Slurry Walls. In: M. W. O’NEILL; F. C. TOWNSEND. **Deep Foundations 2002: An International Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance (Geotechnical Special Publication No. 116)**. New York: ASCE, 2002, p.713-727.

SANTIAGO, L. S.; DIAS, S. M. F. **Matriz de indicadores de sustentabilidade para a gestão de resíduos sólidos urbanos. Engenharia Sanitária Ambiental**, v.17 n.2, p.203-212, 2012.

SANTOS, Pêrsio de Souza. **Tecnologia das Argilas, Aplicadas às Argilas Brasileiras**. Editora da Universidade de São Paulo, Edgard Blucher, 1975.

SANTOS, Pêrsio de Souza. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2ª edição. Vol1. São Paulo: Editora Edgar Blucher Ltda: 1989.

SOUZA, Celis Glávia de. **Recuperação de Nascentes em área rural**. 2014. Disponível em: <<http://www.boaspraticas.org.br/index.php/pt/areas-tematicas/meio-ambiente/20-recuperacao-de-nascentes-em-area-rural>>. Acesso em 18 de novembro de 2018.

SILVA, C. G. T. **Conceitos e Preconceitos relativos às Construções em Terra Crua**. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) - Escola Nacional de Saúde Pública, Fundação Oswaldo Cruz. Rio de Janeiro, 2000

XAXÁ, M. S. S. **Construção com terra crua**: bloco Mattone. Monografia (Graduação) - Graduação em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2013.

YU, H. et al. **Effect of cation exchange capacity of soil on stabilized soil strength**. *Soils and Foundations*, 54 (6). 2014. pp.1236–1240. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sandf.2014.11.016>.